

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ГАГАРІН ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.791.927.55

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ПЛАЗМОВОГО
ГРАДІЄНТНОГО ЗМІЩЕННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ СТАЛЕВИХ
ВИРОБІВ**

спеціальність 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Металорізальні верстати та інструменти» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України, м. Маріуполь.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Самотугін Сергій Савелійович,
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», завідувач кафедри металорізальних верстатів та інструментів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Головко Леонід Федорович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій.

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Шатрава Олександр Павлович,
Фізико-технологічного інституту металів і сплавів
НАН України, старший науковий співробітник відділу
концентрованих енергетичних впливів.

Захист відбудеться «19» грудня 2016р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої ради Д26.002.15 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус №19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «___» листопада 2016р.

Учений секретар
спеціалізованої ради



Рижов Р.М

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розробка новітніх технологій поверхневого зміцнення для важконавантажених великогабаритних сталевих виробів промисловості, які працюють в умовах інтенсивного зношування є актуальною проблемою. Застосування відомих методів ускладнено у зв'язку з великою трудомісткістю і небезпекою виникнення деформацій і несприятливого напруженого стану. Для цих цілей досить перспективно застосування поверхневої обробки висококонцентрованими джерелами нагріву (ВКДН). З методів ВКДН найбільш економічним і продуктивним є плазмове обробка. Однак в даний час відсутні науково обґрунтовані рекомендації з розробки технологій плазмового зміцнення важконавантажених виробів. Одним з перспективних рішень в даному випадку є нанесення зміцнених шарів градієнтної (дискретної) будови.

Для важконавантажених деталей металорізальних верстатів, прокатних валків і т.і. потрібні технології, що забезпечують високу продуктивність обробки в поєднанні з товщиною покриттів, відповідною величині допустимого зносу.

Теплофізичні параметри ВКДН дозволяють формувати поверхневі зміцнені шари з дрібнодисперсною структурою або за рахунок реалізації швидкісного гартування в твердому стані (обробка без оплавлення), або за рахунок гартування при швидкісній кристалізації рідкої фази (обробка з оплавленням). Процеси швидкісного гартування ВКДН в твердому стані досить глибоко вивчені та успішно впроваджені у виробництво. Обробка з оплавленням має обмежене застосування (наприклад, для деталей з чавуну), тому що призводить до підвищення шорсткості й зниження якості поверхні, що не припустимо для таких відповідальних деталей, як напрямні верстатів або рейки.

Процес плазмової обробки може бути легко автоматизований і виконуватися на обладнанні з числовим програмним управлінням. Однак в разі виконання градієнтного зміцнення, коли зміцнені (тверді) ділянки на поверхні виробу чергуються з незміцненими (м'якими), оптимальне управління процесом дуже ускладнюється. Потрібен системний аналіз всієї сукупності факторів (вхідних і вихідних параметрів, включно з геометричними параметрами градієнтного зміцненого шару) на підставі комплексу досліджень структури, твердості, напруженого стану, зносостійкості і шорсткості поверхні. Такі систематизовані дані стосовно зміцнення великогабаритних виробів в даний час у вітчизняній і зарубіжній літературі відсутні. Рішення даного завдання є актуальним і дозволить значно розширити області застосування новітніх технологій поверхневого зміцнення матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Металорізальні верстати та інструмен-

ти» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» в рамках виконання науково-дослідних робіт: «Створення інструментальних сталей нового класу з високим рівнем експлуатаційних властивостей, отриманих з використанням високоефективних плазмових технологій» (номер державної реєстрації 0108U006295), «Створення наукових основ плазмової мікротрибології» (номер державної реєстрації №0109U001373), «Розробка новітніх технологій інженерії поверхні в області різання та зміцнення матеріалів» (номер державної реєстрації 0114U004909). Зазначені науково-дослідні роботи, виконавцем яких був здобувач, стали базовими для підготовки та подання даної дисертації.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи – розробка процесів формування градієнтних шарів з оптимальним розташуванням зміцнених зон і підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей при поверхневій обробці сталей висококонцентрованим плазмовим струменем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Вивчити методи отримання зміцнених шарів і покриттів градієнтної будови на сталях і сплавах.
2. Розробити математичну модель оптимального управління процесом плазмового градієнтного зміцнення поверхні сталевих виробів і методику розрахунку режимів обробки, що забезпечують раціональний розподіл еквівалентних напружень.
3. Розробити методики випробувань і дослідити механізми структурних перетворень в сталях при плазмовій поверхневій обробці, експлуатаційні властивості сталей з поверхневим зміцненням шаром градієнтної будови.
4. Розробити методику випробувань на зносостійкість деталей із зміцненим шаром градієнтної будови.
5. Розробити технологічні процеси плазмової градієнтної обробки сталевих виробів.

Об'єкт досліджень – процеси градієнтного плазмового поверхневого зміцнення сталевих виробів.

Предмет досліджень – закономірності змін мікроструктури та механічних властивостей зміцнених шарів градієнтної будови на сталевих виробках, отриманих при плазмовій обробці.

Методи досліджень: математичне моделювання температури і напруженого стану на ПЕОМ; оптична і електронна металографія структур; випробування на абразивну зносостійкість; вимірювання параметрів якості поверхні; стійкісні випробування зміцнених виробів.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі проведено комплексні дослідження процесу нанесення градієнтних зміцнених шарів при нагріванні висококонцентрованим плазмовим струменем:

1. Вперше показано, що для формування зміцнених шарів градієнтної (дискретної) будови на великогабаритних виробих, що працюють в умовах високих навантажень, найбільш ефективним є спосіб плазмової поверхневої обробки.

2. Вперше розроблено математичну модель і алгоритм розрахунку еквівалентних напружень в зміцнених шарах градієнтного будови. Використано рішення нелінійного рівняння теплопровідності методом скінчених елементів і математичне моделювання напруженого стану з використанням підходу Лагранжа.

3. Вперше досліджено інтенсивність зношування вуглецевих сталей із зміцненим шаром градієнтної будови. Встановлено, що ступінь підвищення зносостійкості залежить від параметрів градієнтного шару. Найбільш висока зносостійкість досягається при величині кута між зонами зміцнення і напрямком зношування, що дорівнює $45-60^\circ$ і величиною зазору між зміцненими зонами в межах 5-6мм. Встановлено закономірності впливу геометричних параметрів градієнтного зміцненого шару на характер зміни параметрів шорсткості поверхні в процесі абразивного зношування: найбільш високу якість поверхні зберігається при геометричних параметрах, які відповідають найбільш високій зносостійкості.

4. Удосконалено конструкцію високоресурсного плазмотрону непрямої дії з секціонованою міжелектродною вставкою. Вперше доведено, що найбільш сприятливий характер витікання газу досягається при виконанні соплової частини плазмотрону у формі конуса з величиною кута 30° . Плазмотрон такого виконання можливо застосовувати при плазмовій обробці поверхонь складної форми.

5. Вперше розроблено системний підхід до аналізу впливу вхідних і вихідних параметрів процесу плазмового градієнтного зміцнення на характеристики зміцнених виробів, що є основою для створення інтегрованих технологічних процесів зміцнення і їх програмного управління.

Практичне значення одержаних результатів. В ході виконання дисертаційної роботи розроблена математична модель, обчислювальні алгоритми для комп'ютерного моделювання напруженого стану поверхневих шарів після впливу плазмового струменя і при експлуатації сталевих виробів. Розроблено інженерну методику розрахунку напружень для вибору оптимальних технологій плазмового поверхневого зміцнення сталей і сплавів як інженерами-технологами в умовах виробництва, так і аспірантами та студентами в навчальному процесі.

Запропоновано конструкцію та створено дослідний зразок установки для випробувань на зносостійкість деталей з градієнтним зміцненим шаром. Дана установка використовувалася для проведення випробувань по темі дисертаційної роботи і застосовується для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Зміцнюючі технології та покриття».

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі Приазовського державного технічного університету при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю «Обробка металів за спецтехнологіями», «Металорізальні верстати та системи».

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі внесок автора складається з самостійного вибору підходів до розрахунку напружень в поверхневих шарах при експлуатації сталевих виробів зміцнених плазмовим джерелом нагрівання, розробки математичної моделі, обчислювальних алгоритмів. Здобувачем проведені дослідження даних процесів, виконано аналіз отриманих результатів, сформульовані висновки і положення, що виносяться на захист. Розроблено та виготовлено установку для випробувань на зносостійкість. Усі результати, наведені у дисертації, отримані самостійно. У друкованих працях із співавторством особисто здобувачем виконані: [1, 5, 6, 14, 16] – дослідження впливу плазмового зміцнення на властивості матеріалів, [2, 4, 9-13] розробка та випробування технології зміцнення, [3, 4, 15] - математичне моделювання напруженого стану, [7, 8] – розробка конструкції плазмотрону

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Інженерія поверхні і реновація виробів» (м. Дніпропетровськ, Україна, 2006), «Технології ремонту, відновлення, зміцнення та оновлення машин, механізмів, обладнання та металоконструкцій» (м. Санкт-Петербург, Росія, 2008), «Нові і нетрадиційні технології в ресурсотехнології енергозбереження» (м. Севастополь, Україна, 2009), «Інноваційні технології розмірної обробки з застосуванням інструментів з надтвердих матеріалів і зміцнення виробів» (м. Магнітогорськ, Росія, 2011), щорічних міжнародних конференціях «Університетська наука» (м. Маріуполь, ДВНЗ «ПДТУ», 2008-2016рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 16 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях, з них – 2 статті у виданнях, які включені до міжнародних науково-метричних баз даних, 2 патенти України на корисну модель та 5 тез і доповідей у збірниках матеріалів конференцій у яких достатньо повно відображені основні результати роботи.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, основних висновків, списку використаних джерел із 161 найменувань і додатків на 3 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 151 сторінка, включаючи 61 рисунок, 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи. Розкрито суть і стан наукової проблеми та її визначення, обґрунтовано актуальність теми дисер-

таційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, встановлено наукове і практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі за результатами аналізу опублікованих робіт досліджено сучасний стан використання покриттів різної будови на деталях та інструменті. В тому числі покриттів, що мають градієнтну або дискретну будову.

Для важконавантажених сталевих виробів використання більшості з відомих методів ускладнено. Це пов'язано з трудоемністю процесів створення таких покриттів, можливості утворення небезпечного напруженого стану або недостатньою товщиною покриття. Для цих цілей найбільш раціональним є використання методів зміцнення ВКДН, з яких найбільш економічним та продуктивним є плазмova обробка.

Для великогабаритних виробів перспективним є вирішення проблеми підвищення зносостійкості нанесенням зміцнених шарів градієнтної будови. Процес плазмової обробки досить глибоко вивчений, може бути автоматизованим, але для цього потрібно проведення системного аналізу сукупності факторів, що мають вплив на процес зміцнення, враховуючі як характеристики плазмового променя, так і геометрії градієнтної будови зміцненого шару.

Дослідженням в області створення зміцнених шарів та покриттів градієнтної (дискретної) будови присвячені роботи Ляшенка Б.А., Антонюка В.С., Клименка С.А., Якштаса Е.В., Малінова Л.С., Подгайского М.С. та інших.

Питання досліджень та розробки нових технологій лазерного та плазмового зміцнення висвітлені в роботах Коваленка В.С., Кривцуна І.В., Головка Л.Ф., Сафонова А.Н., Григор'янца А.Г., Крапошина В.С., Анякіна М.І., Петрова С.В., Самотугіна С.С., Дзюби В.Л., Короткова В.А., Тополянського П.А., Моліана П.А. та інших. Однак багато питань створення градієнтних зміцнених шарів залишаються не вивченими. Відсутні математичні моделі розрахунку напруженого стану зміцнених шарів градієнтної будови та параметрів технологічних процесів, методики визначення експлуатаційних властивостей.

У другому розділі наведені методики випробувань, що були використані при роботі над темою дисертації. Описано обладнання на якому здійснювалось плазмове зміцнення, його характеристики.

Наведено методику виготовлення шліфів з досліджуваних деталей для вивчення структур, що утворюються в поверхневих шарах великогабаритних виробів при плазмовому поверхневому зміцненні.

Для визначення мікроструктури поверхнево зміцнених зразків із сталей на підготовлених шліфах використовувалися методи оптичної та електронної мікроскопії. Для цього застосовувалися мікроскопи MIM-8м, «Neophot-21», «Tesla BS-540», PEM-100У.

Розрахунок напружень, що виникають у результаті градієнтної плазмової обробки та при контактних навантаженнях доцільно проводити за до-

помогою методу скінченних елементів (МСЕ), який широко використовується при силових і динамічних розрахунках механізмів

Розрахунок напружень із застосуванням МСЕ потребує створення тривимірної моделі, розбиття її на потрібну кількість елементів, прикладення навантажень та обмежень, розрахунок та аналіз отриманих даних (рис. 1).

Згідно з підходом Лагранжа, баланс потоку тепла в кожній елементарній точці тіла визначається співвідношенням:

$$(c \cdot \rho \cdot T) \frac{\partial}{\partial t} - \lambda \cdot \nabla_j \cdot \nabla_j \cdot T = \hat{\omega} \quad (1)$$

де λ , c – відповідно, коефіцієнти теплопровідності ($Bm/m K$), теплоємності ($Дж/кг K$);

ρ – щільність матеріалу тіла ($кг/м^3$);

операція $\nabla T = grad(T)$.

$T = T(x^j, t)$ – температура.



Рис. 1 – Блок-схема розрахунку температурних полів МСЕ

Виходячи з деформацій, викликаних нагріванням поверхні при зміцненні, проводиться розрахунок залишкових температурних напружень. Для розрахунку спільної дії температурних напружень з напруженнями, викликаними робочими навантаженнями, необхідно додатково прикласти відповідні сили або тиск.

Наведено методику випробувань на зносостійкість із застосуванням спеціального стенду, в якому є можливість встановлювати зразки збільшено-

го розміру для проведення випробувань в умовах близьких до реальних умов експлуатації великогабаритних виробів із поверхневим шаром градієнтної будови після плазмової обробки. Розмір зразка надає можливість нанесення не менш трьох зміцнених доріжок на різній відстані між ними і під різними кутами.

Після закінчення випробувань проводилося вимірювання шорсткості за допомогою профілограф-профілометра мод. 201 заводу «Калібр» з вимірюванням параметрів шорсткості R_a , R_z .

У третьому розділі наведено результати розрахунків температур та напружень в поверхневому шарі після плазмового градієнтного зміцнення. Наведено алгоритм розрахунку напружень для вибору режимів (геометрії градієнтного шару).

Картина полів напружень після термічної обробки при локальному зміцненні залежить від розташування зон нагріву. Градієнтна плазмова обробка передбачає чергування загартованих ділянок з незміцненими зонами. Для визначення їх оптимальної геометрії для експлуатації в умовах робочих навантажень розглянуто варіанти розташування зміцнених ділянок паралельно, перпендикулярно і під кутом до напрямку зношування (додавання контактних сил) (рис.2) при різному співвідношенні площі зміцненої і незміцненої поверхні.

Для вивчення розподілу напружень в поверхневих шарах після плазмової поверхневої градієнтної обробки перетин зміцненої зони моделювали максимально наближеним до реальних розмірів. Зміцнена зона моделювалася в формі сегмента кола (рис.3), в якому a - глибина зміцненої зони, b - ширина, r - радіус заокруглення, f - відстань між сусідніми зонами. Шаг нанесення зон таким чином складає $b+f$.

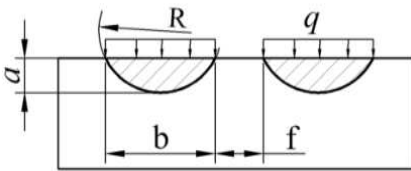


Рис. 2 – Розрахункова схема навантаження поверхні

Для розрахунку залишкових напружень виконано розбиття на скінчені елементи і отримана картина розподілу температур. Ці умови стають вихідними для розрахунку напружень, що утворюються в деталі під дією плазмового променя. Додавання контактних дотичних навантажень дає можливість провести розрахунок еквівалентних напружень в поверхневому шарі деталі (рис. 3).

Відповідність розрахунків підтверджується при порівнянні розподілу температур під впливом плазмового джерела нагріву зі структурою зміцненої зони на макрошліфі (рис. 4).

Для таких характеристик матеріалу як коефіцієнт теплопровідності, враховується його залежність від температури. Для проміжних значень вико-

ристовувалась апроксимація, тому поточне значення теплопровідності визначалась за формулою:

$$\lambda(T) = \lambda_{TM} \cdot F(T) \approx \lambda_{TM} \cdot \left(F(T_k) + \frac{T - T_k}{T_{k-1} - T_k} [F(T_{k-1}) - F(T_k)] \right) \quad (2)$$

де k – номер точки на графіку $F(T)$.

Компоненти тензора температурної деформації для ізотропного матеріалу в MSC Nastran розраховувались за формулою:

$$\varepsilon_{ij}^T = \delta_{ij} \alpha_T \Delta T; \quad \Delta T = T - T_{ref} \quad (3)$$

де α_T – коефіцієнт лінійного температурного розширення;

T_{ref} – температура, при якій в тілі температурна деформація відсутня.

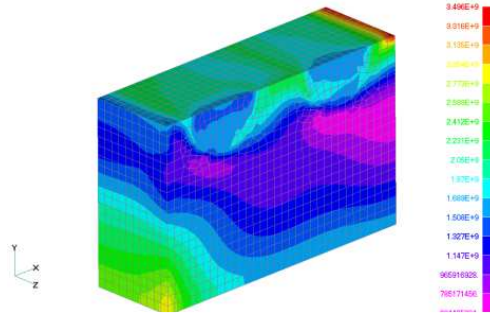


Рис. 3 – Розподіл еквівалентних напружень в сталі 45 після плазмового градієнтного зміцнення

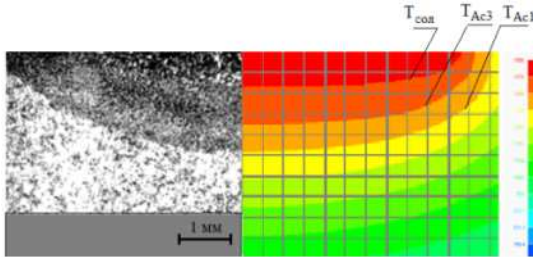


Рис. 4 – Співвідношення розподілу температур і макроструктури зміцненої зони на макрошліфі

Зміна температури призводить до деформацій, які не можуть бути зменшені будь яким чином. Це обумовлено відповідними змінами амплітуди коливань атомів. Температурна деформація відповідає поточній температурі, тому слід застосовувати вираз:

$$\varepsilon_{ij}^T = \delta_{ij} \alpha_T (T_{TM}) \cdot [F(T) \cdot T - F(T_{ref}) \cdot T_{ref}] \quad (4)$$

Між напруженнями і пружними деформаціями існує однозначна функціональна залежність. Функціонал пружної енергії W , за допомогою якого закон пружності виражається було розраховано за виразом:

$$\sigma_{min} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}^e} \quad (5)$$

Результати моделювання показали, що максимальні еквівалентні напруження по Мізесу спостерігаються в перехідній зоні між зміцненим і основним металом (рис. 5). Розроблена модель дозволяє не тільки визначити значення напружень на зміцненій поверхні, але і відображає епюри напружень будь-якої точки зміцненої зони і всієї моделі. Основним завданням є оптимізація розташування зон таким чином, щоб отримати найменші значення напружень в перехідних зонах на поверхні деталі.

Для вирішення поставленого завдання будувалися моделі з розташуванням зміцнених зон (в моделі це місця прикладання теплового потоку) з утворенням незміцнених ділянок шириною f від 1 до 10 мм. При моделюванні для сталі 45 найменші значення напружень були отримані при ширині незміцненої зони 5-6 мм (рис. 6).

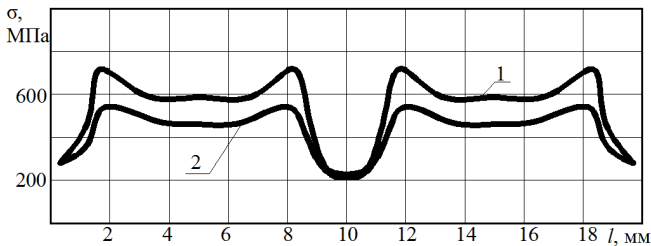


Рис. 5 – Розподіл напружень в зміцнених зонах на сталі 45 (1 – залишкових; 2 – еквівалентних)

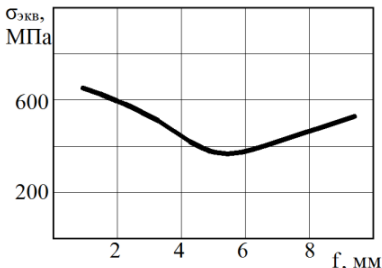


Рис. 6 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від величини зазору між зміцненими ділянками

Порівняння просторових епюр розподілу напружень показує, що під навантаженням поля напружень компенсуються і поверхневий шар знаходиться в сприятливих умовах експлуатації. Це відбувається за рахунок того, що залишкові напруження стискування складаються з контактними дотичними розтягуючими силами, що виникають між взаємодіючими деталями.

В четвертому розділі викладено результати металографічних досліджень, випробувань оброблених плазмовим струменем деталей на зношування, замі-

рів шорсткості зміцнених та зношених поверхонь.

Металографічними дослідженнями встановлено, що основною структурною складовою зони плазмового гартування є мартенсит. Незалежно від складу досліджених сталей він характеризується дуже високим ступенем дисперсності. При цьому в сталях доевтектоїдного складу утворюється мартенсит як рейкової так і платівчастої морфології (рис. 7, б), а в сталях евтектоїдного та заевтектоїдного складу – переважно платівчастої морфології (рис. 7, г). Додаткове зміцнення досягається за рахунок часткового розпаду (самовідпуску) мартенситу і виділення субмікроскопічних частинок вторинних карбідів, рівномірно розподілених в мартенситній матриці (рис. 7, б, г).

Для визначення оптимальної геометрії нанесених зміцнених зон проводилися випробування на зношування зразків з різним розташуванням зміцнених зон. На першому етапі на зразках наносилися зміцнені зони зі змінною величиною зазору (рис. 8). Потім зміцнені зони наносилися під різними кутами по відношенню до напрямку зношування: 0° , 45° , 90° . У кожній групі зразків з різним напрямком обробки ці зони накладалися на різній відстані (0, 3, 5, 7, 9 мм).

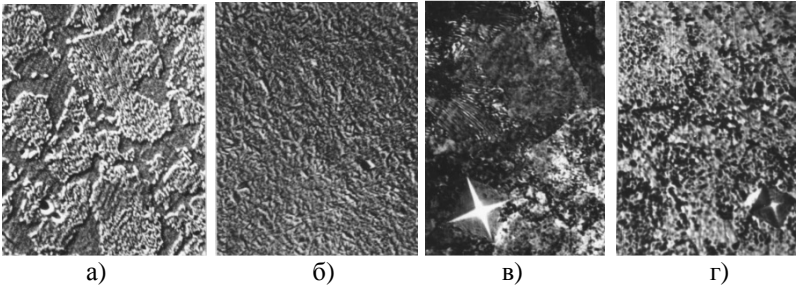


Рис. 7 – Мікроструктура сталі сталей: а,б – 45 в, г – М76 ; а, в – у вихідному стані; б, г – після плазмового зміцнення; а,б – $\times 400$; в, г – $\times 1000$.

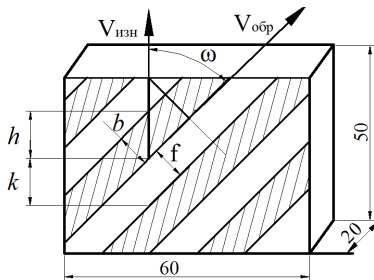


Рис. 8 – Схема нанесення зміцнених доріжок: $V_{\text{изн}}$ - напрямок зношування, $V_{\text{обр}}$ – напрямок обробки.

Коефіцієнт зносостійкості визначається за формулою:

$$K_u = \frac{\Delta m_i}{\Delta m_o} \quad (6)$$

де Δm_i – втрата маси зразка,

Δm_o – втрата маси зразка-еталона (у вихідному стані).

Дослідження показали, що при нанесенні зміцнених зон паралельно напрямку зношування ($\omega = 0^\circ$) максимальна зносостійкість спостерігається при ширині незміцнених ділянок 5-6мм. Лінія, що відображає залежність зносостійкості від зазору між зміцненими зонами, близька до параболи, але при цьому дещо зламана. Не зважаючи на різну зносостійкість сталей 90ХФ і 45, криві подібні, що підтверджує закономірність отриманих в ході випробувань даних. Схожа залежність отримана і при кутах в 45° та 90° між напрямками зміцнення та зношування (рис. 9).

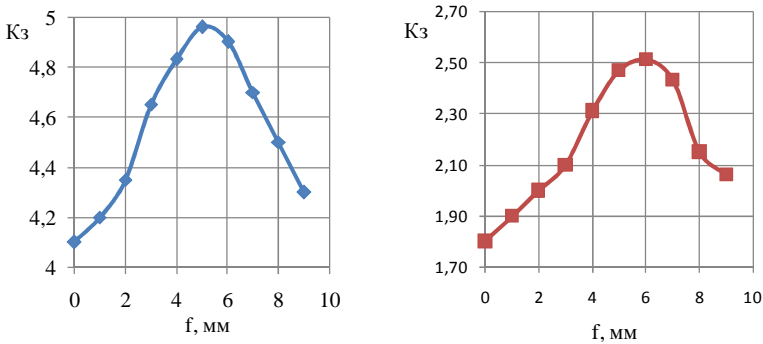


Рис. 9 – Вплив величини зазору між зміцненими доріжками на зносостійкість сталей 90ХФ (а) і 45 (б), при куті нанесення доріжок щодо напрямлення зношування 45°

Порівняння даних зносостійкості при рівній ширині зазору між зміцненими зонами показує, що максимальна зносостійкість може бути досягнута при куті нахилу зон до напрямку зношування під кутом $\omega = 45^\circ$.

Зіставлення результатів обчислень еквівалентних напружень і випробувань зносостійкості (рис. 10) показує, що оптимальні параметри, знайдені за допомогою цих двох методів, збігаються. Це свідчить про те, що в разі плазмової градієнтної обробки сталей з отриманням зазору між зміцненими зонами шириною становить 50% від ширини зміцненої зони реалізується як максимальна зносостійкість, так і найбільш сприятливий розподіл напружень.

Дослідження шорсткості поверхні показали, що після плазмової обробки без оплавлення шорсткість не погіршується. Навпаки, за рахунок мікрооплавлення вершин мікронерівностей, які отримують найбільше тепловкладення і мають мінімальний обсяг, шорсткість незначно знижується, вершини нерівностей округляються. Відбувається значне збільшення радіусів кривизни

мікронерівностей, відношення висоти нерівностей до радіусу зменшується. Абразивні елементи, внаслідок менш гострих мікронерівностей, будуть менше деформувати поверхневі шари зміцненої деталі. У свою чергу мікронерівності поверхнево зміцненої деталі, зважаючи на великі радіуси вершин, не будуть настільки ж інтенсивно дряпати пов'язану поверхню, а в разі відколів, мікрочастинки матимуть менше гострих кромки.

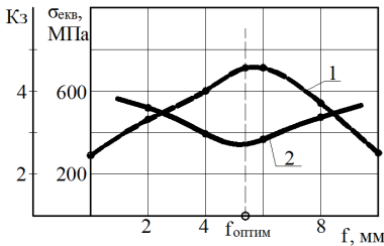


Рис. 10 – Зіставлення зміни коефіцієнта зносостійкості (1) і еквівалентних напружень (2) в залежності від величини зазору між зміцненими зонами для зразків зі сталі 45

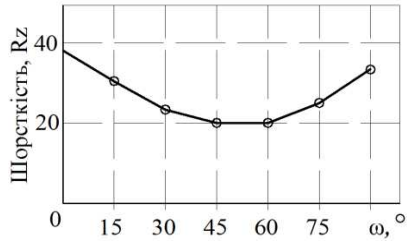


Рис. 11 – Залежність шорсткості поверхні після зношування від кута між напрямком зміцнення і зношування

Після зношування зміцненої поверхні середня висота мікронерівностей знаходиться в межах 40 мкм (рис. 11).

Досліджено вплив величини кута ω нахилу зони щодо напрямку зношування на шорсткість поверхні після зношування. Вимірювання показали, що максимальна шорсткість після зношування відзначається при збігу напрямку зношування і напрямки зміцнених зон (рис.11), а мінімальна - при величині кута між ними, що дорівнює 45° .

У п'ятому розділі викладено результати вдосконалення конструкції плазмотрону для поверхневого зміцнення. Розрахунок проводили за розробленим алгоритмом (рис. 12). Визнано, що використання плазмотрону з сопловою частиною конічної форми дозволяє зменшити тепловий вплив від плазмового струменя (табл. 1), відбитого від зміцненої поверхні, а також використовувати такий плазмотрон для зміцнення деталей складної форми, таких як напрямні металорізальних верстатів (рис. 13).

Для створення технологічних основ плазмового градієнтного зміцнення великогабаритних виробів застосовано системний підхід до аналізу вхідних та вихідних параметрів плазмової обробки. Розроблено технологічну систему плазмового градієнтного зміцнення, яка дозволяє проводити вибір режимів обробки, які забезпечують необхідну геометрію зміцнених зон з урахуванням вимог до експлуатації оброблюваних виробів

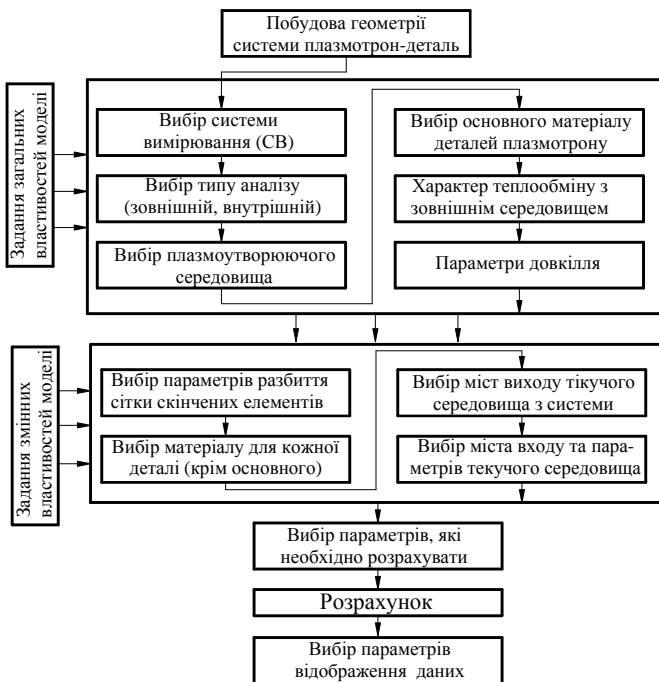


Рис. 12 – Блок-схема розрахунку течії плазмоутворюючого газу

Таблиця 1

Порівняльні характеристики моделей плазмотронів з різним кутом конуса сопла (дистанція обробки – 5мм)

| № | Кут конуса β | Висота конуса a , мм | Діаметр торцю сопла b , мм | Температура газу, що обтікає сопло, °С |
|---|--------------------|------------------------|------------------------------|--|
| 1 | 0 | 0 | 90 | 980 |
| 2 | 20° | 17 | 10 | 710 |
| 3 | 30° | 24,3 | 10 | 450 |
| 4 | 40° | 30,9 | 10 | 420 |

При розробці технологічної системи виходили з того що основним регульованим параметром процесу плазмового поверхневого зміцнення є температура нагріву поверхневого шару T і швидкість охолодження поверхневого шару W . Параметри T і W при розробці технології плазмового зміцнення не є параметрами прямого регулювання, а є комплексними параметрами, на величину яких впливає велика кількість чинників – потужність плазмового

струменя (сила струму I , напруга U); швидкість обробки V (швидкість переміщення плазмотрона); тиск P_f і витрата плазмоутворюючого газу Q_f ; тиск P_v і витрата Q_v , рідини охолоджуючої плазмотрон; дистанція обробки h ; форма і розміри оброблюваного інструменту або деталі; теплофізичні і механічні характеристики оброблюваного матеріалу (γ ; λ ; α ; E ; HV ; σ_T); конструктивні параметри плазмотрона. Всі ці параметри входять до технологічної системи плазмового градієнтного зміцнення (рис. 14).

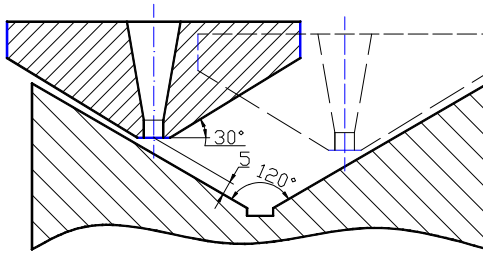


Рис. 13 – Використання плазмотрона з конічним соплом для обробки напрямних металорізальних верстатів.

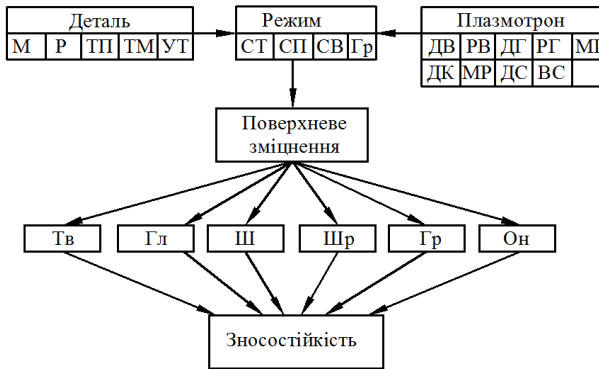


Рис. 14 – Структурна схема технологічної системи плазмового градієнтного зміцнення

Для градієнтного зміцнення поряд із зазначеними вище технологічними параметрами плазмової обробки необхідно враховувати геометричні параметри градієнтного зміцнення. В цьому випадку завдання вибору оптимальної технології плазмової обробки значно ускладнюється.

Розроблена технологічна система є основою при розробці технології плазмової градієнтної обробки великогабаритних виробів, що пройшли промислове випробування, а саме напрямні металорізальних верстатів та кранові рейки.

Кранові рейки можуть бути зміцнені за різними схемами (рис. 15), але

найбільш технологічною є обробка вздовж рейки (рис. 15, а).

Напрявні з плоскими поверхнями доцільніше обробляти під кутом до напрямку переміщення, а похилі – вздовж. Проте будь яка схема забезпечує зміцнення на товщину, що перевищує допустиме зношування (рис. 16).

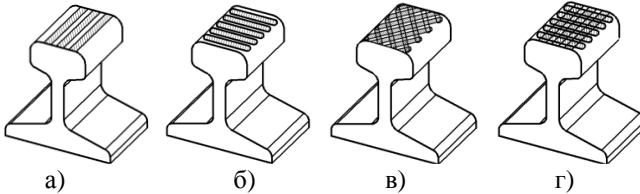


Рис. 15 – Варіанти нанесення градієнтного зміцненого шару на робочу поверхню рейок.

Результати випробувань стійкості напрямних металорізальних верстатів після поверхневого зміцнення в умовах ПАТ «Арселормітал Кривий Ріг» показали, що градієнтне плазмове поверхнєве зміцнення дозволяє збільшити зносостійкість напрямних в 2,5-3 рази.

Випробування за розробленою технологією на базі ТОВ «Сервісний центр «ТЯЖПРОММОНТАЖ» зміцнених кранових рейок показали збільшення стійкості в 2-2.5 раз порівняно зі стандартним часом роботи.

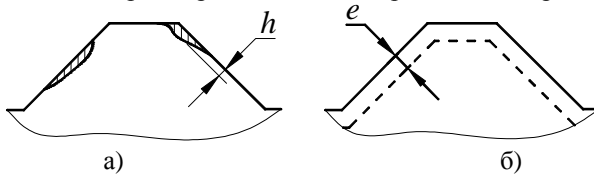


Рис. 16 – Характер зношування напрямних ковзання металорізальних верстатів (а) і вимоги до нанесення поверхнево зміцненого шару (б); h – максимальне зношування; e – товщина шару поверхневого гартування; $e \geq h$

Матеріали дисертаційної роботи застосовані в навчальному процесі Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану методів підвищення експлуатаційних характеристик сталевих виробів показує, що ресурс деталей можна збільшити формуючи певну хвилястість поверхні. Така хвилястість формується і при зносі в процесі припрацювання. Зношені ділянки служать як масляні комірочки. Досвід нанесення покриттів окремими ділянками показує зменшення відслоєнь, у тому числі за рахунок зниження напружень в поверхневому шарі.

2. На основі аналізу світових досліджень в галузі поверхневого зміцнення виявлено, що найбільш перспективними методами для формування градієнтного поверхневого шару є ВКДН. З них найбільш продуктивним і тим що забезпечує найбільший розмір зміцненої зони є плазмова поверхнева обробка. Існує можливість зміцнення локальних ділянок та формування заданої геометрії розташування зміцнених зон, що дозволить підвищити ресурс і надійність деталей і виробів. Однак в даний час відсутні науково обгрунтовані технології плазмового градієнтного зміцнення.

3. Дослідження властивостей сталей після градієнтного зміцнення забезпечено розробленими методиками: для вивчення мікроструктури сталей розроблено методику вирізання зразків, для випробувань на зношування розроблено установку і методику випробувань на зносостійкість в умовах відповідних реальним, запропоновано методику контролю параметрів шорсткості поверхні після зношування, а також методика розрахунку напружень в поверхневих шарах на основі методу скінченних елементів.

4. Дослідження еквівалентних напружень в сталевих виробах показали, що сприятливий розподіл напружень в поверхневому шарі може бути отримано при зміцненні поверхні із зазором між зонами обробки. Розрахунки показують, що мінімальні напруження в поверхневому шарі спостерігаються при відстані між зміцненими зонами в межах 5-6мм. Також має значення кут між напрямком зміцнення і прикладеною силою. Найменші еквівалентні напруження були отримані при значенні кута близько 45°.

5. Розроблена математична модель і алгоритм дозволяють проводити розрахунок режиму обробки і геометрії градієнтного плазмового зміцнення для обробки виробів із урахуванням марки сталі для отримання найбільш сприятливого розподілу еквівалентних напружень в поверхневому шарі в процесі експлуатації.

6. В результаті металографічних досліджень встановлено, що структура вуглецевих сталей після плазмового зміцнення являє собою безструктурний або рейковий мартенсит, що пояснюється подрібненням при надшвидкому охолодженні. Досягається 3,5...4,5-кратне підвищення твердості сталей в порівнянні з нормалізованим станом і на 100...150 HV в порівнянні з об'ємним гартуванням в печі.

7. Збільшення зносостійкості спостерігається при зазорі між зміцненими зонами в межах 5-6мм і куті між напрямком обробки і зношування в 45°. При цих параметрах обробки також фіксується найкращі параметри шорсткості навіть після тривалого зношування. Це обумовлюється наявністю твердих зон, які контактують зі сполученою деталлю і мають малу шорсткість і м'яких (незміцнених) ділянок, які після етапу припрацювання мають властивості масляних кіморок, що сприяють накопиченню і виведенню продуктів зношування, які таким чином не потрапляють в зону контакту.

8. Розроблено системний підхід до вибору режимів обробки та технологічні процеси плазмового градієнтного зміцнення великогабаритних сталевих виробів (на прикладі напрямних верстатів і підкранових рейок) Розроблені технології є інтегрованими, тому що можуть бути легко інтегровані в існуючі технологічні процеси ремонту обладнання. Розробка технологічної системи плазмового градієнтного зміцнення дозволяє легко автоматизувати процес обробки і виконувати його на обладнанні з програмним управлінням. Стійкісні випробування великогабаритних виробів із зміцненим шаром градієнтного будови показали можливість підвищення стійкості в 2..3 рази, що підтверджує актуальність і ефективність промислового використання нових технологій плазмового градієнтного зміцнення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Самотугин С.С. Перспективы использования плазменной градиентной модификации для повышения несущей способности контактных поверхностей пары «рельс-колесо» на железнодорожном транспорте / С.С. Самотугин, Б.А. Ляшенко, В. А. Гагарин, Ю.С. Самотугина. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля.– 2010.–№10 (152), Ч.2. – С. 146-150. Включено до міжнародної науково-дослідної бази Google Scholar.
2. Лаврінченко В. І. Дослідження впливу плазмової обробки на зміну поверхневого шару та експлуатаційні показники твердосплавного інструменту / В.І. Лаврінченко, М.В. Новиков, В.О. Гагарін та ін. // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2009.– Вип. 7.– С. 3-12. Включено до науково-метричної бази РІНЦ.
3. Самотугін С. С. Моделирование напряженного состояния в упрочненных слоях при плазменной поверхностной обработке / С. С. Самотугін, В. О. Гагарін, В. І. Калініченко // Вісник СевНТУ: Зб. наук. праць: Севастополь: СевНТУ. – 2011. – Вип. 117. – С.148-152.
4. Самотугин С. С. Оценка влияния градиентной плазменной модификации на напряженное состояние поверхности стальных изделий // С.С. Самотугин, Б.А. Ляшенко, В.А. Гагарин и др. - Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук.пр.– Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2011. –Вип.13. – С. 121-124.
5. Самотугин С. С. Исследование микрорельефа поверхности деталей с поверхностным упрочненным слоем после абразивного изнашивания // С.С. Самотугин, В.А. Гагарин. – Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2014. – Вип. 26. – С. 152-157.
6. Самотугин С.С. Дискретная модификация поверхностного слоя массивных чугуновых деталей с использованием плазменного нагрева / С.С. Самотугин, Б.А. Ляшенко, В.П. Лихошва, В.А. Гагарин и др. // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук.пр.– Маріуполь: ПДТУ, 2008.–

Вип.10. – С. 214-219.

7. Сомотугін С.С. Принципи удосконалення конструкції плазмотрона для поверхнової укріплюючої обробки напрямлюючих станків / С.С.Сомотугін, В.А.Гагарін // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2013. – Вип. 26. – С. 168-174.

8. Пат.52442 Україна, МПК H05B 7/00. Плазмотрон для поверхневого зміцнення деталей та інструменту / Сомотугін С.С., Гагарін В.О., Мазур В.О., Литвиненко Д.С. – № u 2010 02550 заявл. 09.03.2010; опубл 25.08.2010, Бюл. №16. – 4 с.

9. Пат.41413 Україна, МПК C21D 1/06. Спосіб поверхневого зміцнення інструменту, що має форму тіл обертання / С.С.Сомотугін, В.О. Гагарін, В.О. Мазур/ – № u2008 13420 заявл. 20.11.2008; опубл 25.05.2009, Бюл. №10. – 4 с.

10. Ляшенко Б.А.Технологические основы нанесения упрочняющих покрытий дискретного строения на изделия из чугуна / Б. А. Ляшенко, Ю.С. Сомотугина, В.А. Гагарин. // Научные проблемы современной металлургии. Сб. научн. тр. – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – с.162-172.

11. Сомотугін С.С., Мазур В.О. Процес плазменної поверхнової модифікації як технологічна система / С.С. Сомотугін, В.А. Гагарін // Новітні технології в машинобудуванні. Металообробка, інструмент, реновація : Зб. наук. праць редкол. Сомотугін С.С. та інш. - Маріуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. 2. – С. 350-358.

12. Сомотугін С.С. Использование методов синергетики при прогнозировании износостойкости модифицированных слоев дискретного строения / С.С. Сомотугін, В.А. Гагарін, Ю.С. Сомотугина // Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкций: Материалы междунар. научно- технической конф. – Севастополь, 25-28 августа 2010г. – Севастополь: ООО «Актив принт». – 2011. – С. 28-29.

13. Сомотугін С.С. Промышленное применение технологии плазменного упрочнения деталей и инструмента / С.С.Сомотугін, В.А. Мазур, В.А. Гагарін // «Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановление деталей»: 3-я научн. практ. конф., Днепропетровск, ноябрь 2007.– Днепропетровск: ВЦ Метеор, 2007.– С. 70-74.

14. Сомотугін С.С. Плазмові градієнтні поверхневі зміцнення на прямих металорізальних верстатів / С.С. Сомотугін, В.О. Гагарін // Университетская наука – 2016: Международная научно- техническая конференция: сб. тезисов докладов в 3. т. – Мариуполь, 15-18 мая 2016г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2016. – т. II. – С. 44-45.

15. Гагарін В. А. Определение напряженного состояния покрытий градиентной структуры / В.А. Гагарін // Университетская наука – 2011: Международная научно- техническая конференция: сб. тезисов докладов в 3. т. – Мариуполь, 17-19 мая 2011г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2011. – т. II. – С.

130-132.

16. Гагарин В.А. Применение поверхностной плазменной обработки для повышения износостойкости сталей / В.А. Гагарин // Университетская наука – 2008: Международная научно-техническая конференция: сб. тезисов докладов в 2. т. – Мариуполь, 19-21 мая 2008г. – Мариуполь: ПГТУ, 2008. – т. II. – С. 15.

АНОТАЦІЯ

Гагарін В.О. «Удосконалення технологічних систем плазмового градієнтного зміцнення великогабаритних сталевих виробів». – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», МОН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню впливу плазмового градієнтного зміцнення на експлуатаційні характеристики поверхневого шару великогабаритних виробів.

Розроблена математична модель та алгоритм розрахунку напружень в поверхневому шарі зміцнених виробів дозволяє досліджувати характер розподілу напружень після зміцнення та під час роботи. Проведені випробування на зношування поверхонь після плазмового градієнтного зміцнення показали, що максимальна зносостійкість досягається при розташуванні зміцнених ділянок на відстані 5-6мм. Встановлено що максимальна зносостійкість при градієнтному плазмовому зміцненні відповідає найбільш сприятливому розподілу еквівалентних напружень. Розроблену математичну модель можна застосовувати для розрахунку та вибору оптимальних параметрів плазмової градієнтної обробки. Запропоновано розглядати процес плазмового градієнтного зміцнення як технологічну систему що має вхідні та вихідні параметри. Це дозволяє обирати параметри плазмової обробки та геометрію нанесення зміцнених зон для отримання потрібних характеристик поверхні на великогабаритних виробах з вуглецевих та легованих сталей

Ключові слова: градієнтний, плазмовий струмінь, плазмотрон, структура, твердість, напруження, зносостійкість, напрямні, рейки.

АННОТАЦИЯ

Гагарин В.А. Совершенствование технологических систем плазменного градиентного упрочнения крупногабаритных стальных изделий. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.07 - процессы физико-технической обработки. -

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», МОН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена исследованию влияния плазменного градиентного упрочнения на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя крупногабаритных изделий.

Разработанная математическая модель и алгоритм расчета напряжений в поверхностном слое упрочненных изделий позволяет исследовать характер распределения напряжений после упрочнения и во время работы. Проведенные испытания на износ поверхностей после плазменного градиентного упрочнения показали, что максимальная износостойкость достигается при расположении упрочненных участков на расстоянии 5-6 мм. Установлено, что максимальная износостойкость при градиентном плазменном упрочнении соответствует наиболее благоприятному распределению эквивалентных напряжений. Разработанную математическую модель можно применять для расчета и выбора оптимальных параметров плазменной градиентной обработки. Предложено рассматривать процесс плазменного градиентного упрочнения как технологическую систему с входными и выходными параметрами. Это позволяет выбирать параметры плазменной обработки и геометрию нанесения упрочненных зон для получения нужных характеристик поверхности на крупногабаритных изделиях из углеродистых и легированных сталей.

Ключевые слова: плазменная струя, градиентный, плазматрон, структура, твердость, напряжение, износостойкость, направляющие, рельсы.

ABSTRACT

Haharin V.O. "Improvement of technological systems designed for plasma gradient hardening of large steel products" – Manuscript copyright.

Dissertation for the degree of Candidate of Engineering Sciences, Specialty 05.03.07 "Physical and technical treatment processes" – National technical university of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kyiv, 2016.

The research aims at further development of the plasma surface hardening technology, namely by creating a gradient structured layer with improved performance properties on the product surface.

The analysis of modern methods of making reinforced coatings for steel products has been implemented, as well as the analysis of capabilities and benefits of surface layers hardened by coatings with gradient and discrete structure.

In this paper, the mathematical model of stress calculation in a hardened layer with gradient structure has been developed using the finite element method. The proposed model allows to consider material properties in the calculation, analyze the temperature distribution and its impact on properties and perform calculations of residual thermal stresses, as well as equivalent stresses when adding contact loads.

The proposed model has been used to calculate the stresses induced by plasma gradient treatment, as well as stresses resulting from the further use of products processed with this technology. The calculations of the optimal structure of the gradient plasma hardened surface have been performed in order to get the most favorable equivalent stresses within the surface layer. The most favorable distribution of equivalent stresses has been observed with the distance between hardened areas equaling 5 to 6 mm and the width of hardened areas equaling 10mm.

Metallographic examinations of the layers hardened by plasma gradient treatment have been conducted. The areas hardened by plasma processing have the structure of structure less martensite if made from hypoeutectic steels and of fine-lathed martensite with secondary carbides if made from eutectic or hypereutectic steels.

The effect of plasma gradient hardening geometry on wear resistance of carbon steels has been studied. The samples with different distances between hardened areas and different angles between the hardening and wearing directions have been tested for wear resistance. The best results have been obtained for the distance between hardened areas of 5 to 6 mm and the angle of 45°.

The results of minimal equivalent stresses calculation have been compared to the wear testing data. The best results have been obtained for identical processing conditions. This fact allows to use the proposed mathematical model to select the modes of plasma gradient processing.

A pre- and post-hardening surface roughness measurement has been implemented, as well as the surface roughness measurement after the hardened surface wear-out. The hardened surface has the same or lower roughness compared to the original surface which enables for the use of plasma gradient hardening as the final processing method without the need of further machining. The roughness of hardened areas is reduced after wear-out which further enhances the durability of related parts.

A technological system of plasma gradient hardening has been created that allows to define processing modes and geometry of hardened areas application in order to obtain the desired surface characteristics on products made from carbon and alloy steels.

In order to confirm the developed technology and methodologies, a hardening of machine tool guides and further testing in a production environment have been performed. The results have shown that the stability of hardened guides is 2.5 to 3 times higher than that of non-hardened ones. The stability of crane rails hardened by plasma gradient processing exceeds the original values from 2 to 2.5 times.

Keywords: gradient, plasma jet, plasmatron, structure, hardness, tension, wear resistance, guides, rails.